

МАЛЬЧИКОВ Константин Юрьевич

РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА
ДАТЧИКОВ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ
ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Специальность 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) на кафедре радиотехнических устройств и в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории ОНИЛ-16.

Научный руководитель:	Заслуженный работник высшей школы РФ доктор технических наук, профессор Логвинов Леонид Митрофанович
Официальные оппоненты:	Заслуженный работник высшей школы РФ доктор технических наук, профессор Калакутский Лев Иванович Кандидат технических наук, доцент Татаренко Евгений Иванович
Ведущее предприятие:	Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-производственный ракетно-космический центр "ЦСКБ-Прогресс"

Защита состоится "25" декабря 2009г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.05, созданном при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета

Автореферат разослан " 24 " ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:
д.т.н., профессор

А.А.Калентьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Гидравлические системы (ГС) являются одними из наиболее распространенных и широко используемых механизмов в современной авиационной и космической технике. Значительное усложнение структур современных гидросистем привело к существенному повышению требований к надежности, как отдельных узлов, так и ГС в целом. Особенно жесткими эти требования становятся для ГС, эксплуатация которых происходит в условиях повышенной температуры и давления, значительным уровнем вибрации и пульсации.

Надежность и долговечность ГС находится в прямой зависимости от чистоты внутренних полостей этих систем и рабочих жидкостей (РЖ) используемых в них. Частицы износа, генерируемые в РЖ в процессе эксплуатации – один из главных источников отказов гидравлических систем. Поэтому, контроль степени загрязнения гидравлической жидкости является одной из основных задач, которую предстоит решить при диагностике состояния гидравлической системы.

Изменение основных параметров (количество, размеры, материалы) механических частиц износа, генерируемых в РЖ процессе эксплуатации гидросистемы, является источником информации об истории течения процесса изнашивания трибомеханических узлов. Анализируя эти параметры можно получить данные о техническом состоянии ГС. Анализ работ В.А. Бербера, А.М. Матвеевко, Р.Г. Тимиркеева, Е.С. Фитча позволил выделить критерии контроля уровня чистоты РЖ по параметрам частиц износа.

Работы С.П. Беляева, Л.И. Калакутского, И.А. Кудрявцева, Л.М. Логвинова, А.Г. Ованесяна, В.Е. Шатерникова, К.С. Шефрина, а также зарубежных авторов К. Грина, Х. Соммера, М. Керкера и др. внесли значительный вклад в развитие исследований в области контроля уровня загрязнения РЖ.

В настоящее время разработкой средств контроля параметров частиц износа занимаются многие как российские, в том числе ОАО «НИТИ-Тесар» (г. Саратов), НПП «Техноприбор» (г. Москва), НИАТ (г. Москва), так и зарубежные предприятия: HYDAC (Германия), Hiac Royko (США), COULTRONICS FRANCE SA (Франция) и др. Однако, анализ разработанных и внедренных к настоящему времени датчиков встроенного контроля (ДВК) параметров частиц износа показал, что они с высокой степенью достоверности регистрируют частицы размером от 5 мкм и более. Однако, с учетом тенденции увеличения давления в магистралях ГС изделий машиностроения и в частности перспективных изделий авиационной и космической техники, необходимо анализировать дисперсный состав частиц износа размером 1-5 мкм.

Проведенный анализ современных средств встроенного контроля параметров дисперсной фазы (ДФ) РЖ показал, что сконструировать ДВК подобной чувствительности, позволяющий контролировать частицы износа столь малого размера в тяжелых условиях эксплуатации (при высоких уровнях давления и температуры, вибрации и пульсации) затруднительно в силу возникновения ряда технических проблем и требует значительных материальных затрат. Поэтому, наиболее перспективным представляется метод расширения диапазона размеров регистрируемых частиц износа, основанный на статистической обработке экспериментальных данных о распределении частиц износа, который позволяет, не внося существенных изменений в конструкцию ДВК, определять дисперсный состав частиц износа размером 1-2 мкм по экспериментальным данным о распределении частиц размером более 5 мкм.

Таким образом, расширение динамического диапазона регистрируемых размеров частиц износа при воздействии внешних дестабилизирующих факторов (температура, давление, вибрация, пульсация) является актуальной научно-технической задачей имеющей большое практическое значение.

Целью данной работы является разработка и теоретическое обоснование методики и алгоритмов расширения динамического диапазона существующих датчиков встроенного

контроля параметров дисперсной фазы РЖ, позволяющего определять дисперсный состав частиц износа размером 1-2 мкм по экспериментальным данным о распределении частиц размером более 5 мкм.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, что определило структуру и основное содержание диссертации.

Задачи диссертационной работы:

1. Анализ методов встроенного контроля уровня загрязнения рабочей жидкости, сравнительная оценка *in-line* и *on-line* методов контроля параметров частиц износа в РЖ;
2. Модификация обобщенной гидродинамической модели гидравлического тракта ДВК параметров частиц износа работающих в широком диапазоне температуры и расхода РЖ;
3. Разработка алгоритма инженерной методики расчета основных конструктивных параметров гидродинамического тракта ДВК;
4. Исследование методов и алгоритмов обработки экспериментальных данных о распределении дисперсного состава частиц износа в РЖ с помощью параметрической аппроксимации и аппроксимации на основе ортогональных функций;
5. Разработка алгоритма расширения динамического диапазона регистрируемых частиц износа до 1-2 мкм на основе экспериментальных данных о распределении частиц размером более 5 мкм;
6. Экспериментальное исследование эффективности разработанных методов восстановления распределения дисперсного состава частиц износа в РЖ;
7. Разработка программного обеспечения (ПО) для систем контроля уровня загрязнения РЖ, позволяющего определять дисперсный состав частиц износа размером 1-5 мкм по экспериментальным данным о распределении частиц размером более 5 мкм.

Методы исследования.

В диссертационной работе используются методы структурно-функционального анализа, теоретические основы гидродинамики, методы аппроксимативного анализа и численного решения систем дифференциальных уравнений, экспериментальные исследования и имитационное моделирование с помощью ЭВМ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена модифицированная обобщенная гидродинамическая модель ДВК *in-line* и *on-line* типов, отображающая связь геометрических параметров гидравлического тракта датчика при условии изокINETического отбора пробы РЖ;
2. Разработана методика расширения динамического диапазона размеров контролируемых частиц износа до 1-2 мкм на основе «восстановления» функции плотности вероятности распределения параметров дисперсной фазы рабочей жидкости по экспериментальным данным о распределении частиц размером свыше 5 мкм;
3. Предложена методика повышения точности контроля концентрации дисперсной фазы за счет рационального выбора количества дифференциальных коридоров и исследована зависимость от объема первоначальной выборки.

Практическую ценность работы представляют:

1. Модифицированная конструкция гидродинамического узла ДВК *in-line* и *on-line* типов, позволяющая расширить рабочий диапазон расхода и давления РЖ при сохранении изокINETичности отбора пробы;
2. Предложенная схема конструкции ДВК *on-line* типа, обеспечивающая возможность эксплуатации в широком диапазоне температур РЖ;
3. Разработанный алгоритм проведения инженерных расчетов основных параметров гидравлического тракта ДВК;

4. Программное обеспечение для систем контроля уровня загрязнения РЖ позволяющее производить анализ концентрации частиц износа размером 1-2 мкм по экспериментальным данным о дисперсном составе частиц размером более 5 мкм.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на 7 международных, всероссийских и региональных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2006), Научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении (ПИТ-2006)» (Самара, 2006), Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» (Самара, 2007), 4-й научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности» (Москва, 2007), IV Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (Казань, 2009), Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» (Самара, 2009), Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2009).

На защиту выносятся:

1. Модифицированная обобщенная гидродинамическая модель гидравлического тракта ДВК *in-line* и *on-line* типов, отображающая связь геометрических параметров гидравлического тракта при условии изокINETического отбора пробы РЖ;
2. Методика расширения динамического диапазона размеров контролируемых частиц износа до 1-2 мкм на основе «восстановления» функции плотности вероятности распределения параметров дисперсной фазы рабочей жидкости по экспериментальным данным о распределении частиц размером свыше 5 мкм;
3. Методика повышения точности контроля концентрации дисперсной фазы за счет рационального выбора количества дифференциальных коридоров гистограммы распределения дисперсного состава.

Публикации:

По теме диссертационной работы автором опубликовано 10 работ, в т.ч. 7 статей, из них 2 – в периодических научных и научно-технических изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 127 страниц машинописного текста, включая 9 таблиц, 40 рисунков. Список использованных источников составляет 102 наименования.

ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, определены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ научно-технической проблемы контроля уровня загрязнения РЖ по параметрам частиц износа, генерируемых в процессе эксплуатации ГС, в ходе которого были определены основные источники загрязнения РЖ, влияние частиц износа на надежность гидрооборудования, а так же обоснован выбор диагностических критериев оценки технического состояния гидроагрегатов по параметрам частиц износа. Проведен сравнительный анализ существующие в настоящее время методов и средств контроля параметров частиц загрязнения рабочей жидкости.

Из обобщенной схемы ГС (рис. 1) видно, что ввиду замкнутости ГС возникновение механических частиц износа на любом из ее участков вызывает постепенный износ поверхностей трения трибомеханических узлов. В результате этого в систему генерируется большое количество частиц износа, которые забивают фильтры и приводят к отказам прецизионных элементов.

На основе применения ДВК

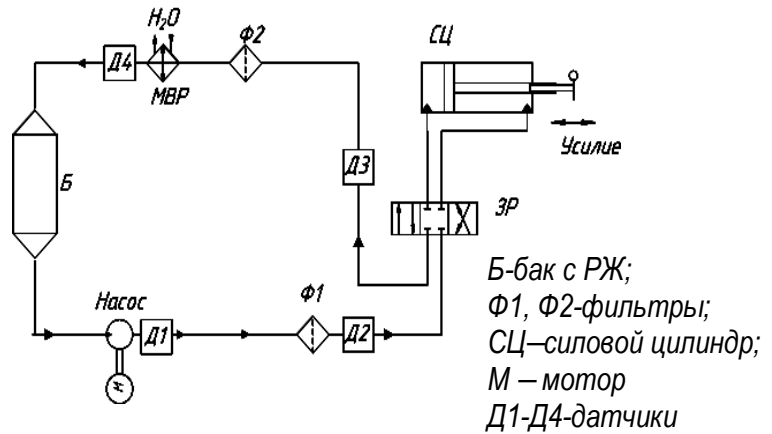


Рисунок 1 – Обобщенная схема ГС технологического оборудования

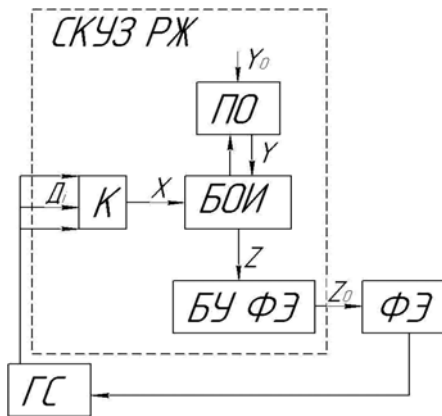


Рисунок 2 – Система контроля и управления уровнем загрязнения РЖ

параметров частиц износа была предложена система встроенного контроля и управления уровнем загрязнения (СКУЗ) РЖ приведенная на рисунке 2. Она включает в себя коммутатор (К) выходов ДВК; блок обработки информации (БОИ), анализирующий данные об уровне загрязнения РЖ, получаемые с ДВК и формирующий управляющие сигналы, передаваемые в блок управления фильтрующими элементами (БУ ФЭ) и специализированного программного обеспечения (ПО).

На сегодняшний день используются два основных метода встроенного контроля параметров частиц износа классифицирующиеся по способу отбора пробы РЖ, схематично изображенные на рисунке 3.

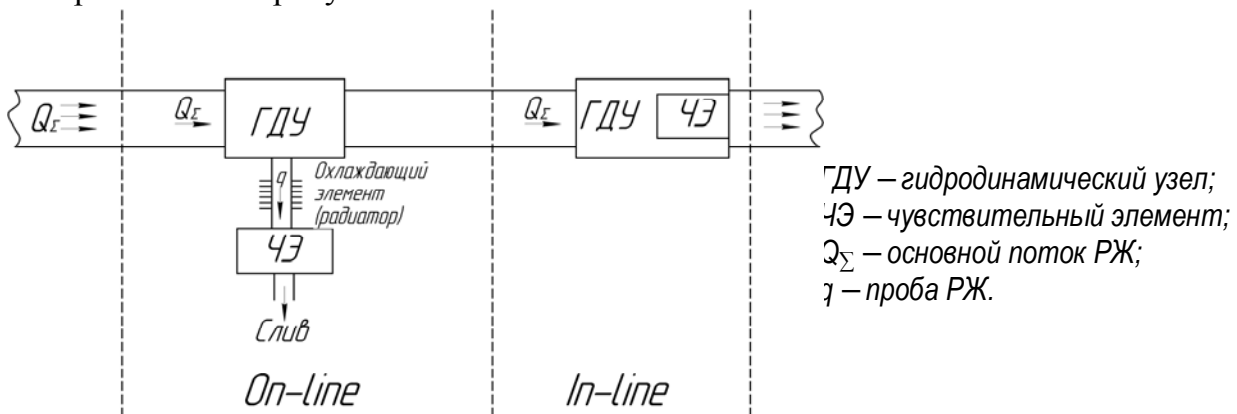


Рисунок 3 – Функциональная схема методов встроенного контроля параметров дисперсной фазы

Анализ современных ДВК показал, что в настоящее время достаточно широко используются виброакустические, акустоэмиссионные, ультразвуковые и другие методы контроля параметров частиц износа. Однако наиболее эффективным и перспективными являются фотоэлектрические ДВК *in-line* и *on-line* типов.

Большое распространение получил фотоэлектрический датчик «Поток» (рис. 4), разработанный в лаборатории ОНИЛ-16 СГАУ под руководством Логвинова Л.М. и входящий в состав системы контроля чистоты гидравлической жидкости «ФОТОН-965» (номер в госреестре 32924-06). Уникальность этого датчика заключается в том, что она позволяет определять уровень загрязнения непосредственно в потоке рабочей жидкости при расходах жидкости до 100 л/мин и давлении в ГС до 28 МПа.



Рисунок 4 – Фотоэлектрический ДВК *in-line* типа «Поток»

Вторая глава посвящена разработке и анализу модифицированной обобщенной гидродинамической модели ДВК параметров частиц износа *in-line* и *on-line* типов, а также определению алгоритма инженерных расчетов основных геометрических параметров гидравлического тракта проектируемого датчика.

В данной главе проанализирована функциональная схема технологического процесса контроля уровня чистоты РЖ, разработанная с учетом специфики встроенного контроля параметров частиц износа. Она представляет собой последовательность перемещения частиц в РЖ от момента ее генерации в трибомеханическом узле и отделении от поверхности трения до прохождения через измерительный объем первичного преобразователя. Приведены рекомендации по минимизации осаждения частиц на стенках трубопроводов между трибомеханическим узлом и датчиком.

Особое внимание в данной главе уделено вопросу отбора представительной пробы РЖ и определению условия нарушения изокинетичности пробоотбора, а так же сформулированы требования к обеспечению соответствия параметров дисперсной фазы в основной магистрали трубопровода и в пробозаборном капилляре гидродинамического узла (ГДУ) датчика.

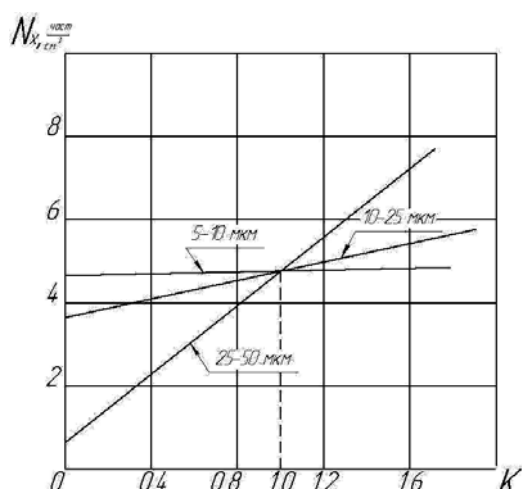
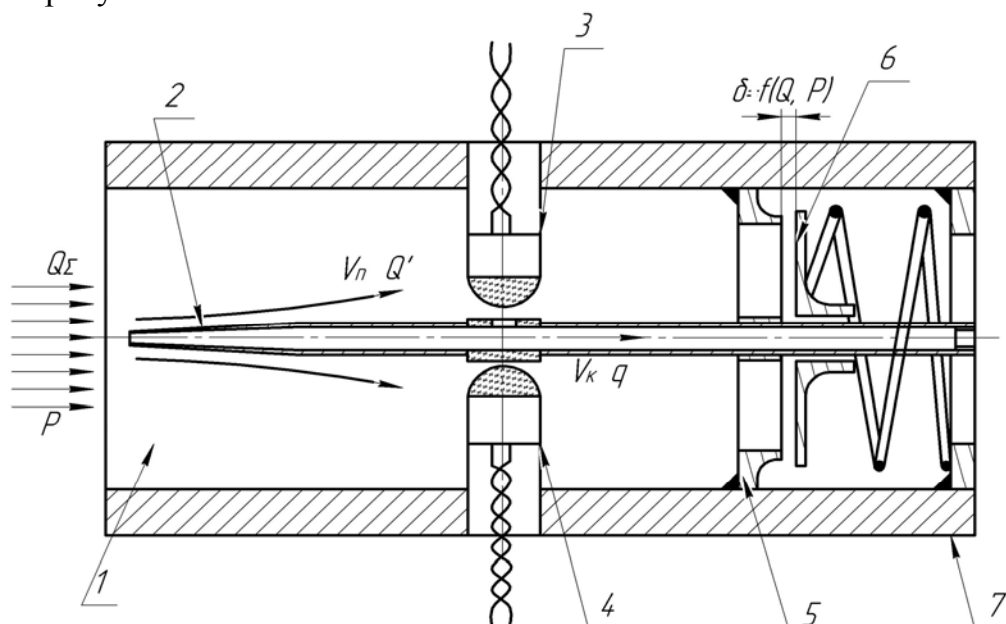


Рисунок 5 – Зависимость регистрируемой концентрации механических частиц износа (N_x) от коэффициента изокинетичности (K)

Из графика зависимости регистрируемой концентрации частиц износа от коэффициента изокинетичности (K) (рис. 5) видно, что влияние изокинетичности отбора пробы на концентрацию частиц износа малого размера (5-10 мкм) минимально, однако с увеличением размеров частиц влияние коэффициента K существенно возрастает. Это обусловлено коэффициентом увлечения частиц износа, которое наиболее существенно с увеличением размера частиц. При этом наибольшая достоверность результатов контроля достигается при $K=1$.

Была модифицирована конструкция фотоэлектрического ДВК *in-line* типа для обеспечения изокинетичности контролируемого потока в широком диапазоне расхода и давления РЖ. Особенностью данного типа датчиков состоит в том, что ГДУ и чувствительный элемент ДВК находится непосредственно в потоке РЖ, что обеспечивает возможность контроля параметров частиц износа и их концентрацию в РЖ при рабочих значениях давления

и расхода жидкости. Гидродинамический узел данного типа ДВК состоит из двух частей, пробозаборного капилляра и адаптивного регулятора расхода РЖ, которые обеспечивают изокINETический отбор контролируемого потока. Схема конструкции ДВК *in-line* типа приведена на рисунке 6.



1 – основная магистраль; 2 – пробозаборный капилляр ИК; 3 – излучатель (светодиод);
4 – фотоприемник; 5 – диафрагма; 6 – регулирующий клапан.
7 – корпус датчика;

Рисунок 6 – Схема конструкции фотоэлектрического датчика встроенного контроля параметров частиц износа в рабочей жидкости *in-line* типа

Однако, несмотря на все известные достоинства фотоэлектрических ДВК *in-line* типа, они имеют ограниченный диапазон температур РЖ, при которых возможна их эксплуатация. Так при значительном повышении температуры (до 70°C) в полупроводниках чувствительного элемента фотоэлектрического преобразователя происходят необратимые процессы вплоть до их полного теплового разрушения. Для разрешения данной проблемы необходимо понизить температуру рабочей жидкости. На практике, осуществить это непосредственно в основном потоке при большом уровне расхода практически невозможно. Поэтому, необходимо предусмотреть в конструкции датчика дополнительный контур для отвода пробы РЖ, в котором установлен теплообменник, т.е. перейти от ДВК *in-line* типа к ДВК *on-line* типа. Конструкция ДВК *on-line* типа для применения в условиях повышенной температуры РЖ подробно рассмотрена в диссертации.

С учетом особенностей конструкции ДВК параметров частиц износа *in-line* и *on-line* типов, а также основных уравнений гидродинамики была предложена модифицированная гидродинамическая модель (рис. 7), позволяющая связать основные геометрические параметры гидравлического тракта датчика при условии изокINETического отбора пробы РЖ.

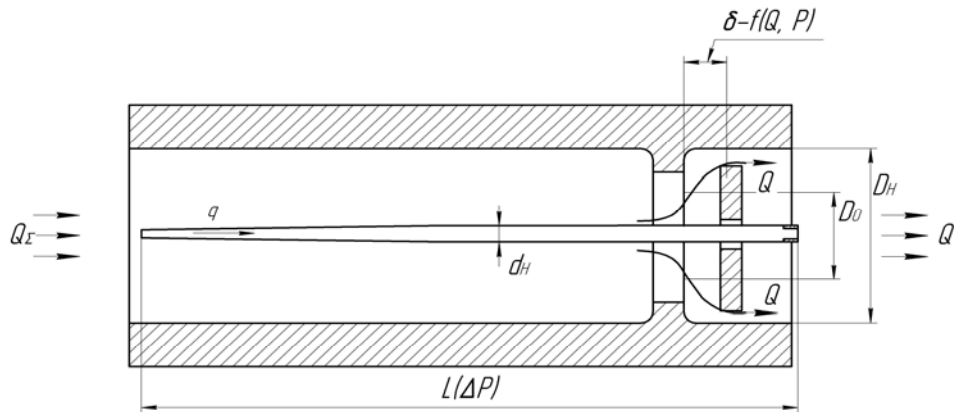


Рисунок 7 – Обобщенная модифицированная гидродинамическая модель ДВК

Анализ предложенной гидродинамической модели был проведен на основании уравнения Бернулли:

$$P_{вх} + \rho \frac{V_{вх}^2}{2} = P_{вых} + \rho \frac{V_{вых}^2}{2} + \xi \cdot \rho \frac{V_{вых}^2}{2}, \quad (1)$$

где $P_{вх}$ – входное давление,

$P_{вых}$ – давление на выходе из дат-

чика, $\rho \frac{V^2}{2}$ – скоростной напор по-

тока жидкости, $V_{вх}$ – скорость по-

тока РЖ на входном срезе,

$V_{вых}$ – выходная скорость потока

ρ – плотность жидкости.

Результаты теоретического анализа были подтверждены экспериментально. На рисунке 8 приведен график зависимости перепада давления на капилляре от расхода РЖ через ДВК при постоянной температуре.

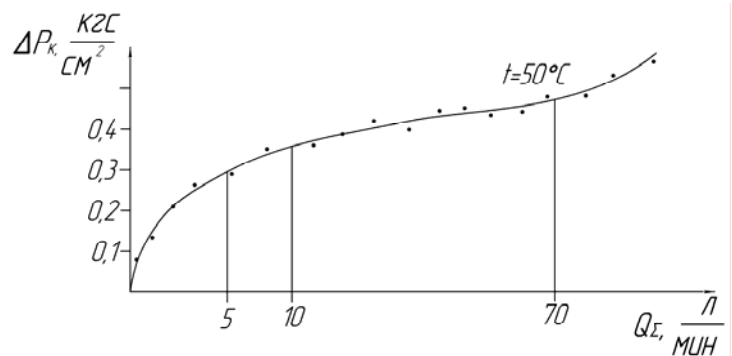


Рисунок 8 – Изменение перепада давления на капилляре в зависимости от расхода РЖ

На основании предложенной модифицированной гидродинамической модели ДВК с учетом введенного коэффициента изокинетичности было получены уравнения, описывающие скорости потоков РЖ в измерительном канале и через адаптивный регулятор в зависимости от скорости потока в основном трубопроводе:

$$\begin{cases} V_k = \frac{V}{K}, \\ V_p = \frac{D_H^2 - K \cdot d_0^2}{D_H^2 - d_H^2} M \cdot V, \end{cases} \quad (2)$$

где K – коэффициент изокинетичности, V – скорость потока РЖ в трубопроводе,

V_k – скорость потока в капилляре, V_p – скорость потока РЖ через адаптивный регулятор,

D_H – диаметр основного трубопровода, d_0 – диаметр пробозаборного капилляра,

d_H – диаметр пробозаборного капилляра с учетом толщины стенок, $M = S_0/S_1$ – отноше-

ние площадей поперечного сечения внешнего канала (S_0) и адаптивного регулятора (S_1).

Данная модель соответствует ДВК как *in-line*, так и *on-line* типов и используется для определения основных геометрических и гидравлических характеристик разрабатываемого датчика.

Разработан алгоритм расчета основных геометрических параметров гидравлического тракта ДВК.

Третья глава посвящена разработке методики и алгоритмов расширения динамического диапазона регистрируемых частиц износа существующих ДВК. В основе разработанной методики лежит применение статистической обработки данных, получаемых с выходов ДВК.

Для описания распределения частиц загрязнения в рабочей жидкости можно воспользоваться различными теоретическими и экспериментальными зависимостями. Благодаря свойству устойчивости формы кривых, наиболее подходящим способом аналитического описания дисперсного состава частиц загрязнения является описания в виде плотности вероятности (ПВ). Знание закона распределения позволяет решать широкую группу как теоретических, так и прикладных задач, например, обоснованно экстраполировать дисперсный состав по всему необходимому диапазону размеров частиц или по данным весового распределения вычислять распределение частиц по их числу, объему и т.п. Таким образом, аппроксимируя ПВ дисперсного состава частиц износа размером более 5 мкм можно определить значения параметров, позволяющие получить оценку распределения дисперсного

состава частиц размером 1-5 мкм (рис. 9).

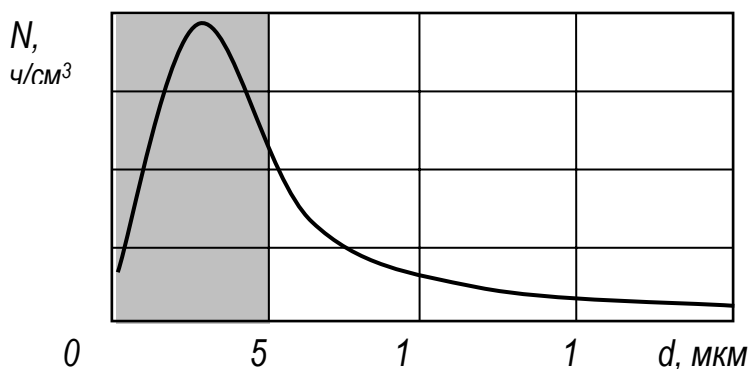


Рисунок 9 – Модель распределения дисперсного состава частиц износа

Были проведены исследования параметрической аппроксимации и аппроксимации с помощью ортогональных функций Лагерра, Лежандра и Дирихле., Анализ результатов показал, что аппроксимация с помощью ортогональных функций дает лучшую сходимость результатов. Однако, «восстановление» функции плотности вероятности возможно только с помощью параметрической аппроксимации.

Известно, что распределения дисперсного состава частиц износа в жидкости подчиняется логарифмически-нормальному закону распределения. Таким образом, для аналитического описания дисперсного состава наиболее обоснованным является выражение:

$$f_a(x, a, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - a)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

где a – математическое ожидание, σ – среднеквадратическое отклонение величины $\ln(x)$.

Для определения оптимальных значений параметров аппроксимирующей функции воспользуемся методом наименьших квадратов, т.е. должно выполняться условие минимума квадратической погрешности:

$$\Delta = \sum_{j=1}^M [f_x(x_j) - f_a(x_j, a, \sigma)]^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $f_x(x_j) = \frac{y_j}{y_\Sigma}$ – значение плотности вероятности соответствующее j -му дифференци-

альному коридору, y_j – количество частиц в j -м дифференциальном коридоре, y_Σ – общее количество частиц износа.

Для решения задачи аппроксимации опытных данных функцией (3) в диапазоне размеров частиц износа более 5 мкм и восстановление плотности вероятности в области 1-5 мкм необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} = \sum_{j=1}^M [\hat{f}_x(\bar{x}_j) - f_a(\bar{x}_j, \alpha, \sigma)] \frac{\partial f_a(\bar{x}_j, \alpha, \sigma)}{\partial \alpha} = 0, \\ f_2 = \frac{\partial \Delta}{\partial \sigma} = \sum_{j=1}^M [\hat{f}_x(\bar{x}_j) - f_a(\bar{x}_j, \alpha, \sigma)] \frac{\partial f_a(\bar{x}_j, \alpha, \sigma)}{\partial \sigma} = 0, \\ \frac{1}{M} \cdot \sum_{j=1}^M [f(x_j, \alpha, \sigma) \cdot \Delta x_j] = 1. \end{cases} \quad (5)$$

Корни решения данной системы уравнений, в соответствии с методом Ньютона, примут вид:

$$a_{n+1} = a_n - \frac{1}{\Delta'} \left[\frac{\partial f_2}{\partial \sigma_n} f_1(a_n, \sigma_n) - \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_n} f_2(a_n, \sigma_n) \right], \quad (6)$$

$$\sigma_{n+1} = \sigma_n - \frac{1}{\Delta'} \left[\frac{\partial f_1}{\partial a_n} f_1(a_n, \sigma_n) - \frac{\partial f_2}{\partial a_n} f_2(a_n, \sigma_n) \right], \quad (7)$$

где $\Delta' = \frac{\partial f_1(a, \sigma)}{\partial a} \frac{\partial f_2(a, \sigma)}{\partial \sigma} - \frac{\partial f_1(a, \sigma)}{\partial \sigma} \frac{\partial f_2(a, \sigma)}{\partial a}$.

Как известно, метод Ньютона критичен к выбору начальных условий. Для обеспечения сходимости метода при аппроксимации плотности распределения в качестве начальных условий решения уравнений (7), (8) целесообразно использовать значения МО и СКО, рассчитанных на основе экспериментальных данных, полученных с выхода ДВК:

$$a_0 = \left(\sum_{j=1}^M (\hat{f}_x(\bar{x}_j) \cdot \ln(x_j)) \right), \quad \sigma_0 = \sum_{j=1}^M (\hat{f}_x(\bar{x}_j) \cdot (\ln(x_j) - a)^2). \quad (8)$$

При этом выполнение итерационного алгоритма следует продолжать до тех пор, пока не выполнится условие:

$$\begin{cases} |\alpha_{n+1} - \alpha_n| \leq \varepsilon, \\ |\sigma_{n+1} - \sigma_n| \leq \varepsilon. \end{cases} \quad (9)$$

Пример восстановления функции плотности вероятности приведен на рисунке 10. Относительная погрешность прогнозирования составила $\delta = 14\%$. При этом, практике допустимым значением погрешности определения дисперсного состава частиц износа является величина $\delta = 20...30\%$.

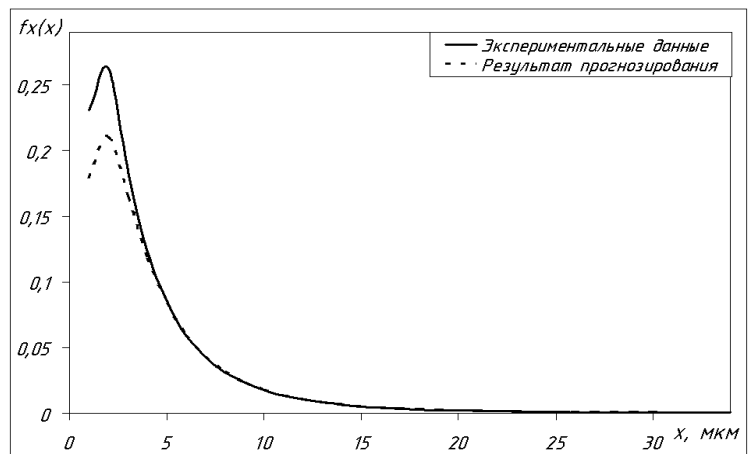


Рисунок 10 – Результат восстановления функции плотности распределения дисперсного состава частиц износа.

В четвертой главе рассмотрен вопрос повышения точности контроля концентрации дисперсной фазы рабочей жидкости.

При обработке экспериментальных данных о распределении дисперсного состава частиц износа в РЖ с помощью параметрической аппроксимации плотности вероятности про-

изводится замена истинного распределения аналитическим выражением (3) с рассчитанными оптимальными значениями параметров аппроксимирующей функции. При этом неизбежно возникает отклонение истинного значения от его оценки.

Для оценки степени соответствия полученной оценки и истинного распределения можно воспользоваться критерием согласия Пирсона (χ^2).

На основе применения критерия согласия Пирсона в данной главе был выполнен расчет количества дифференциальных коридоров необходимых для проведения анализа. При этом были получены следующие результаты.

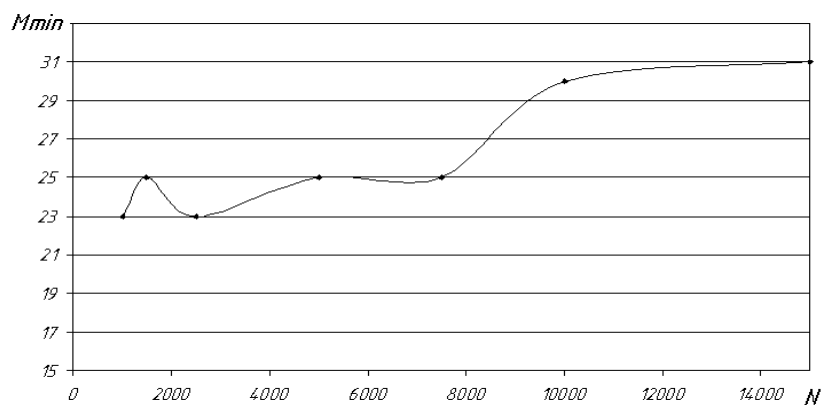


Рисунок 11 – Зависимость минимального количества дифференциальных коридоров от объема выборки

На рисунке 11 представлен график зависимости количества дифференциальных коридоров (интервалов разбиения гистограммы) для оценки плотности вероятности, согласующейся по критерию Пирсона от объема выборки. Как видно из приведенного графика, с увеличением объема выборки необходимо увеличивать количество интервалов дискретизации гистограммы.

Это происходит потому, что при увеличении объема выборки яснее проявляются особенности плотности вероятности, и требуется подвергать анализу большее число дифференциальных коридоров, чтобы эти особенности зафиксировать в оценке. Анализ показал, что при дальнейшем увеличении объема выборки ($N > 15000$) увеличение необходимого количества дифференциальных коридоров ($M_{min} > 31$) практически не происходит.

На рисунке 12 представлен график зависимости значений критической статистики (χ^2) от объема выборки (N) для каждого значения количества интервалов разбиения гистограммы (M). Как видно из приведенного графика, для каждого из приведенных объемов выборки максимальные значения критической статистики находятся близко к верхнему граничному значению для уровня значимости $\alpha = 0.01$, $\chi^2 = 48.278$.

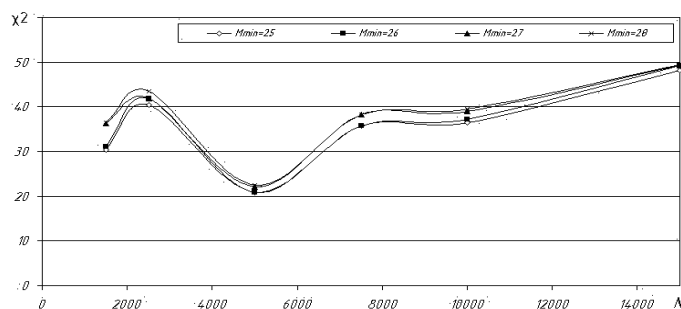


Рисунок 12 – Зависимость критической статистики критерия Пирсона от объема выборки

В пятой главе была разработана архитектура системы (рис. 13) контроля чистоты РЖ, описана ее практическая реализация, а также приведены результаты экспериментальных исследований.



Рисунок 13 – Архитектура системы контроля

Размеры частиц износа более 5 мкм преобразуются с помощью ДВК в электрический сигнал, который поступает на обработку в мик-

роконтроллер, и затем выдается на электронный блок индикации и поступает в виде входных данных для выполнения алгоритма определения концентрации частиц размером 1-5 мкм в ЭВМ.

Схема алгоритма программы для ЭВМ, обеспечивающей выполнение алгоритма расширения динамического диапазона ДВК, представлена на рисунке 14.

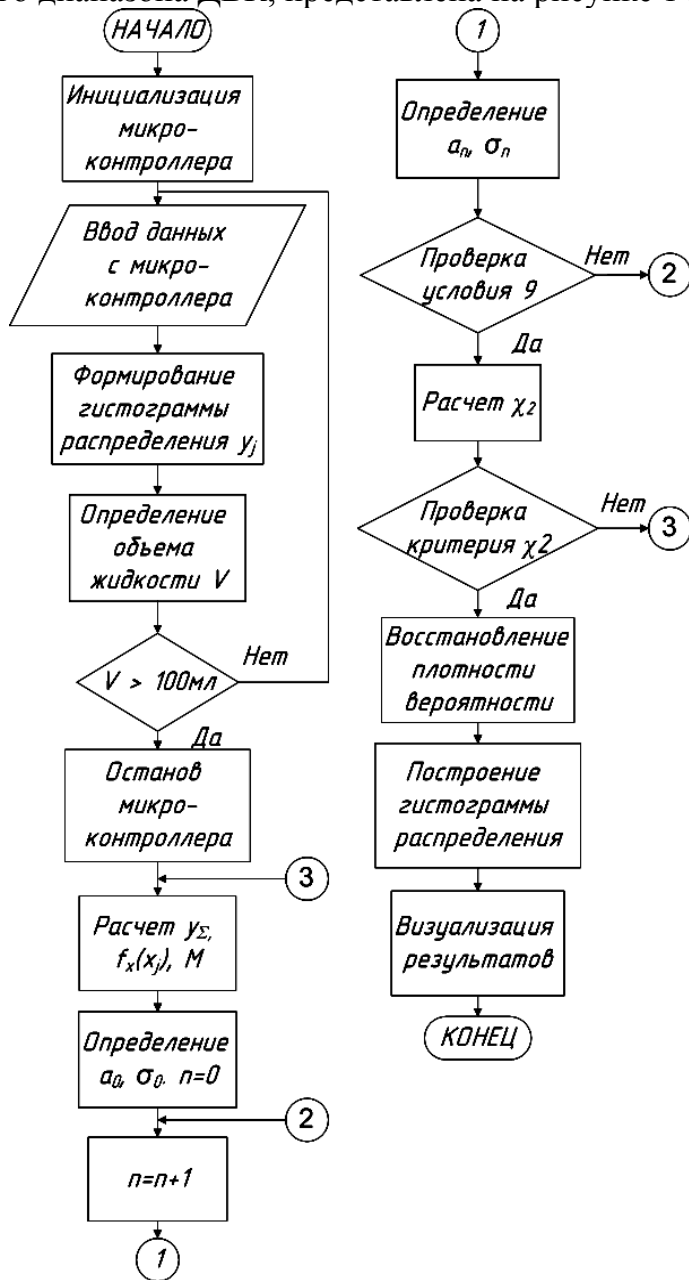


Рисунок 14 – Схема алгоритма программы для ЭВМ

На рисунке 15 приведена экранная форма программного обеспечения для ЭВМ, предназначенного для выполнения алгоритмов, повышающих динамический диапазон ДВК.

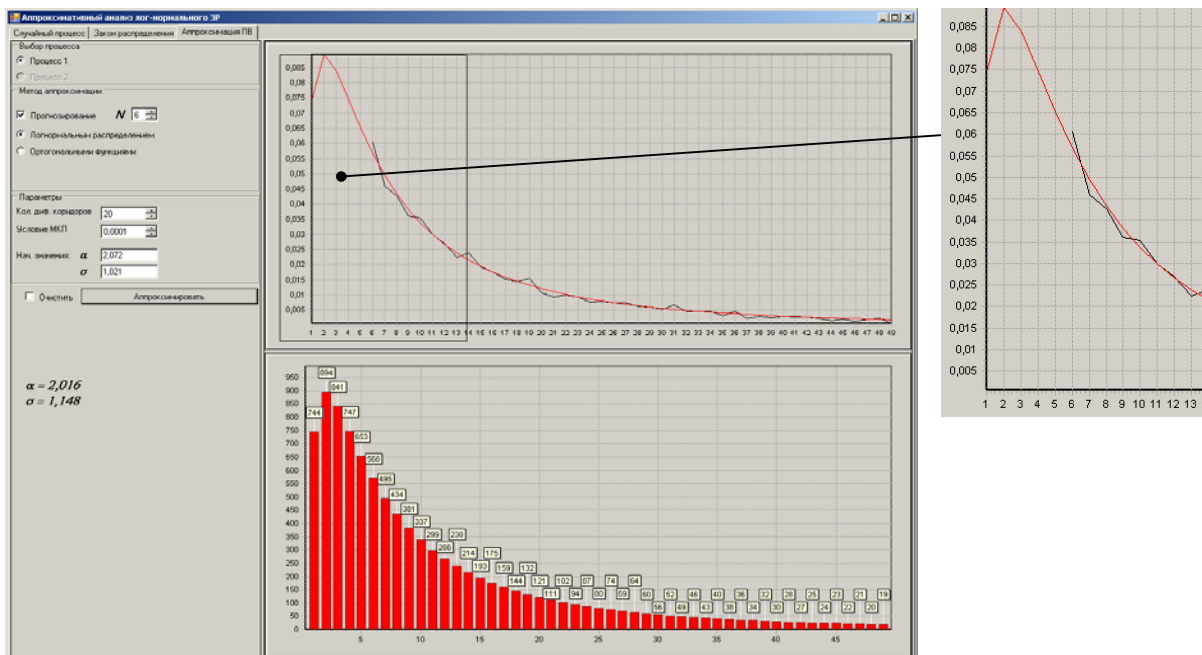


Рисунок 15 – Экранная форма программы для ЭВМ

В заключении сформулированы основные выводы и результаты. Приведены технические характеристики ДВК параметров ДФ РЖ до и после внедрения полученных результатов.

Таблица 1 – Технические характеристики ДВК ДФ РЖ

№ п.п.	Характеристика	До модификации	После модификации
1	Диапазон контролируемых частиц износа, мкм	5-200	1-200
2	Предел температуры контролируемой РЖ, °С	60	150
3	Диапазон расхода РЖ через ДВК, л/мин.	5-15	5-75
4	Пределы основной относительной погрешности при измерении счетной концентрации частиц размером 100-200 мкм, %	±20	±20
5	Дополнительная погрешность при измерении счетной концентрации частиц за счет совпадения двух и более частиц в измерительном объеме ДВК при предельной концентрации 1500 частиц/см ³ , %	15	15

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследованы существующие средства встроенного контроля уровня загрязнения РЖ по параметрам частиц износа. Анализ показал, что использование ДВК *in-line* дает большую точность определения параметров частиц по сравнению с ДВК *on-line* типа. Наблюдается хорошая сходимость результатов при контроле частиц размером 10-25 мкм и существенные расхождения результатов контроля частиц 25-50 мкм и более.
2. Разработана обобщенная модифицированная гидродинамическая модель ДВК *in-line* и *on-line* типов параметров частиц износа и алгоритм расчета параметров датчика, устанавливающая связь геометрических параметров гидравлического тракта датчика при условии изокINETического отбора пробы РЖ.
3. Предложена модифицированная схема конструкции фотоэлектрического ДВК *in-line* типа, включающего в себя адаптивный регулятор расхода РЖ для обеспечения изокINETичности отбора пробы в большом диапазоне расхода РЖ. Результаты

экспериментальных исследований показали, что введение адаптивного регулятора позволило расширить диапазон расхода РЖ через ДВК в 15 раз.

4. Предложена модель конструкции ДВК *on-line* типа для использования в условиях высокой температуры РЖ до 150 °С.
5. Исследованы методы аппроксимации плотности вероятности распределения параметров дисперсной фазы РЖ с помощью логарифмически-нормального распределения и ортогональных функций Лагерра, Лежандра и Дирихле. Анализ результатов исследования показал высокую точность обоих методов, относительная погрешность которых соответственно составляет $\delta_{л.р.}=8-12\%$, $\delta_{о.ф.}=5-9\%$ соответственно.
6. Предложен алгоритм расширения диапазона размеров контролируемых частиц износа с помощью «восстановления» плотности вероятности распределения ДФ РЖ в области 1-2 мкм по экспериментальным данным о распределении дисперсного состава частиц износа размером более 5 мкм.
7. Проведено экспериментальное исследование эффективности разработанных методов алгоритмов аппроксимации и «восстановления» функции плотности вероятности распределения параметров дисперсной фазы РЖ на основе критерия согласия Пирсона (χ^2). Была определена зависимость необходимого количества интервалов разбиения гистограммы от объема выборки.
8. Предложена архитектура системы контроля чистоты РЖ и разработано программное обеспечение для нее, реализующее алгоритмы расширения диапазона размеров контролируемых частиц износа.

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Мальчиков, К.Ю. Алгоритм обработки сигналов, формируемых датчиками встроенного контроля параметров частиц загрязнения рабочей жидкости гидросистем. [Текст] / Л.М. Логвинов М.А. Ковалев, К.Ю. Мальчиков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск «Перспективы и направления развития транспортной системы». – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2007. с. 214-217.
2. Мальчиков, К.Ю. Применение аппроксимативного анализа результатов экспериментов в задаче диагностирования технического состояния гидросистем [Текст] / К. Ю. Мальчиков, Л. М. Логвинов, М. А. Ковалев // Вестник СГАУ вып. 3 (19) ч. I. с. 2009. с.82-89

Статьи в других изданиях

3. Мальчиков, К.Ю. Автоматизированная система аппроксимативного анализа технического состояния узлов трения гидросистем. [Текст] / К.Ю. Мальчиков, Л.М. Логвинов, М.А. Ковалев. // Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении (ПИТ-2006): Труды НТК с международным участием. Том 1. – Самара, 2006. с. 175 – 179.
4. Мальчиков, К.Ю. Аппроксимативный анализ технического состояния трибомеханических узлов гидросистем на основе ортогональных функций Лагерра. [Текст] / К.Ю. Мальчиков, М.А. Ковалев. // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Материалы докладов Всероссийской НТК. – Самара: СГАУ, 2007. с. 26-30.
5. Мальчиков, К.Ю. Аппроксимативный анализ параметров частиц загрязнения рабочей жидкости гидросистем. [Текст] / К.Ю. Мальчиков, Л.М. Логвинов, М.А. Ковалев. // Исследования и перспективные разработки в авиационной про-

- мышленности: Материалы докладов 4-й научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – М.: ОАО «ОКБ СУХОГО», 2007г. с.893 – 897.
6. Мальчиков, К.Ю. Встроенный контроль уровня загрязнения рабочей жидкости в гидросистемах изделий авиационной и космической техники на основе использования фотоэлектрических датчиков. [Текст] / Л.М. Логвинов, М.А. Ковалев, К.Ю. Мальчиков. // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Материалы докладов Всероссийской НТК. – Самара: СГАУ, 2009. с. 40-44.
 7. Мальчиков, К.Ю. Применение методов аппроксимативного анализа в задачах повышения разрешающей способности фотоэлектрических датчиков встроенного контроля уровня загрязнения рабочей жидкости в гидравлических системах.. [Текст] / К.Ю. Мальчиков. // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Материалы докладов Всероссийской НТК. – Самара: СГАУ, 2009. с. 40-44.

Тезисы докладов

8. Мальчиков, К.Ю. Автоматизированная система для исследования состояния узлов трения гидросистем. [Текст] / К.Ю. Мальчиков, Л.М. Логвинов М.А. Ковалев. // Проблемы и перспективы развития двигателестроения Материалы докладов Международной НТК. Часть 1. – Самара: СГАУ, 2006. с. 10-12.
9. Мальчиков, К.Ю. Алгоритм повышения чувствительности фотоэлектрических датчиков встроенного контроля параметров частиц загрязнения рабочей жидкости гидросистем. [Текст] / К.Ю. Мальчиков, Л.М. Логвинов, М.А. Ковалев. // Материалы докладов IV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. д-ра физ-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. В 4 т.; Т. 1. - Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009. с. 97-98.
10. Мальчиков, К.Ю. Модификация гидравлической модели фотоэлектрического датчика встроенного контроля уровня загрязнения рабочих жидкостей. [Текст] / К.Ю. Мальчиков, Л.М. Логвинов, М.А. Ковалев. // Материалы докладов IV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. д-ра физ-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. В 4 т.; Т. 1. - Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009. с. 98-100.